



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

SPOLUSPALOVÁNÍ KALŮ V JIŽ STÁVAJÍCÍM ZAŘÍZENÍ

CO-INCINERATION SEWAGE SLUDGE IN THE EXISTING PLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

TOMÁŠ KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ FRÝBA

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Krejčí

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Spoluspalování kalů v již stávajícím zařízení

v anglickém jazyce:

Co-incineration sewage sludge in the existing plant

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše současného stavu úrovně techniky v oblasti spalování kalů v již stávajícím zařízení na výrobu elektřiny a tepla.

Cíle bakalářské práce:

Seznámení s problematikou spalování kalů

Shrnutí legislativy v oblasti ochrany ovzduší a kalového hospodářství

Nutné úpravy již stávajícího zařízení pro spalování kalů

Vytvoření přehledu zařízení na spalování a spalování kalů v zahraničí

Technologie spalování a systému čištění spalin

Seznam odborné literatury:

- [1] European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussels, available on <http://eippcb.jrc.es>, 2006
- [2] Boráň, J.: Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008. 127s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc
- [3] URBAN, V. Spalování čistírenských kalů s přídavkem alkálií. Brno, 2011. 66 s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková Ph.D.
- [4] Zákon 201 ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lukáš Frýba

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 5.11.2012

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Práce je zaměřena na problematiku spoluspalování čistírenských kalů v již stávajících zařízeních. Úvodem se práce zabývá krátkým shrnutím kalového hospodářství, způsoby úpravy kalu a následnými metody využití za účelem likvidace. Následující kapitola obsahuje výpočet výhřevnosti v závislosti na obsahu vody a organického podílu kalu, vytváří přehled zařízení využitelných k termickému zpracování kalu a popis spoluspalování v již stávajících zařízeních. Pozornost legislativním parametrům ovlivňujících způsoby nakládání s čistírenským kalem byla věnována kapitola sedm. Poté co byl kal termicky zpracován je nutné se zbavit škodlivin v podobě emisí, z tohoto důvodu následuje popis škodlivin vznikajících při procesech spalování a nejvýznamnějších zařízení k jejich odstranění či snížení. Závěrem byla vypracována rešerše o metodách termického využití kalu v zahraničních státech.

Klíčová slova

Čistírenský kal, kalové hospodářství, výhřevnost, spoluspalování, čištění spalin

Abstract

This thesis focuses on problems with co-incineration of sewage sludge in existing plants. The introduction of my thesis deals with a brief summary of a sludge management, sludge treatment methods and subsequent utilizations methods used for sludge disposal. Next chapter contains a calculation of calorific value, depending on the water content and volatile substances in dry solids of the sludge, it offers an overview of devices applicable for thermal processing of sludge and a description of the co-incineration in existing plants. The seventh chapter is devoted to the legislative parameters which influence the ways of dealing with sewage sludge. After the thermal treatment of sludge it is necessary to decontaminate flue gases of harmful substances resulting from incineration process, thus following there is a description of the most important devices used for its elimination or its reduction. My work ends with a search of methods dealing with the thermal sludge utilization in foreign countries.

Key words

Sewage sludge, sludge management, calorific value, co-incineration, flue gas cleaning

Bibliografická citace

KREJČÍ, T. *Spoluspalování kalů v již stávajícím zařízení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Frýba.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Spoluspalování kalů v již stávajícím zařízení*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 16.5.2013

.....
Tomáš Krejčí

Poděkování :

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Frýbovi za podporu při tvorbě práce, mnoho cenných rad v průběhu plnění, ochotu a obětovaný čas. Dále bych rád chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Kropáčovi za pomoc při závěrečné kontrole.



Obsah

1	Úvod	11
2	Vznik čistírenského kalu	12
2.1	<i>Složení a vlastnosti čistírenského kalu</i>	<i>12</i>
2.2	<i>Úprava čistírenských kalů</i>	<i>12</i>
2.2.1	Primární kal	12
2.2.2	Zahušťování	13
2.2.3	Stabilizace	13
2.2.4	Odvodňování	13
2.2.5	Sušení kalů	13
3	Hierarchie nakládání s odpady	14
4	Zpracování a likvidace čistírenského kalu	15
4.1	<i>Skládkování</i>	<i>16</i>
4.2	<i>Využívání kalu v zemědělství</i>	<i>16</i>
4.3	<i>Kompostování</i>	<i>17</i>
4.4	<i>Termické využití</i>	<i>17</i>
5	Spalování a spolu-spalování čistírenského kalu	17
5.1	<i>Výpočet výhřevnosti kalu a stanovení závislosti na obsahu vody v ČK</i>	<i>18</i>
5.2	<i>Hlavní typy spalovacích pecí</i>	<i>20</i>
5.2.1	Spalování ve fluidní vrstvě	20
5.2.2	Spalování v etážových pecích	21
5.2.3	Spalování na roštových pecích	22
5.2.4	Spalování v rotačních pecích	22
5.3	<i>Druhy spolu-spalování čistírenských kalů</i>	<i>23</i>
5.3.1	Spolu-spalování v elektrárnách a teplárnách	23
5.3.2	Spolu-spalování v cementářských pecích	24
5.3.3	Spolu-spalování čistírenských kalů ve spalovnách odpadu	25
5.4	<i>Nutné změny stávajících zařízení</i>	<i>25</i>
6	Legislativa	27
7	Systém čištění spalin	29
7.1	<i>Znečišťující látky</i>	<i>29</i>
7.2	<i>Zařízení k odstranění škodlivin</i>	<i>30</i>
8	Termické zpracování ČK v zahraničí	34
8.1	<i>Německo</i>	<i>34</i>
8.2	<i>Nizozemsko</i>	<i>35</i>
8.3	<i>Rakousko</i>	<i>36</i>

9	Závěr	37
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek.....	41
	Seznam použitých symbolů a zkratk:	42
	Seznam příloh	43

1 Úvod

V dnešní době se čím dál více na průmyslové sféře zmiňuje problém ohledně čištění odpadních vod, obsahující velké množství organických i anorganických látek, které je potřeba zachytit a zbavit tak vodu kontaminace. Koncentrovanou látku tohoto složitého procesu čištění nazýváme čistírenský kal, jehož objem v poslední době nezastavitelně narůstá. Za následek narůstajícího objemu čistírenských kalů považujeme, především narůstající znečištění vod. V neposlední řadě také novelu zákona o vodách, která udává omezení obsahu škodlivých látek ve vodě a stanovuje přípustné množství znečištění, viz [1]. Zpřísnění kontrol na kvalitu vody má za následek vyvíjení nových technologií na zachycení co největšího obsahu znečišťujících látek, tudíž dochází k větší produkci kalu. Z tohoto hlediska nám nastává problém jak s tímto produktem naložit. Kal obsahuje kromě výživových látek (fosfor, dusík, vápník, atd.), které mají blahodárný vliv na zemědělskou či jinou půdu, také velké množství těžkých kovů a jiných škodlivin, jejichž množství je třeba složitým procesem čištění před následným využitím odstranit, nebo alespoň snížit na přípustné hodnoty koncentrací. Stávající trend likvidace čistírenského kalu (ČK) na území ČR je uplatnění kalu jako hnojiva na zemědělskou půdu či skládkování. V zemích EU je tomu ale právě naopak, vzhledem k čím dál většímu znečištění vod se od tohoto trendu ustupuje, neboť může docházet ke kontaminaci půdního ekosystému. V mnoha zemích začínají platit zákony o snížení či úplnému zákazu skládkování a omezení využívání na zemědělskou půdu. A proto se ve většině evropských zemí začalo využívat spalování či spolu-spalování, za účelem využití energetického potenciálu ukrytého v kalu a v neposlední řadě docílení razantního snížení objemu. Tato technologie je vlivem zařazení moderních systémů čištění spalin a optimálního nastavení spalování považována za neekologičtější.

Tato bakalářská práce se bude v první řadě zabývat obecnou rešerší stávajícího stavu kalového hospodářství, nakládání s ním a možnostmi využití jeho energetického potenciálu při spolu-spalování v již stávajícím zařízení, jakožto příměsného paliva. Následně budou popsány produkty vzniklé při spalování, které je z hlediska ochrany životního prostředí nutné zachytit či zcela odstranit v systému čištění spalin. V posledních dvou kapitolách bude zmíněna stávající legislativa a termické využití ČK v zahraničních státech.

2 Vznik čistírenského kalu

Čištění odpadních vod spočívá v zachycování nežádoucích látek a nečistot obsažených ve vodě a tím zabránění dopadu na zdraví organismů a životního prostředí. Kal představuje asi 1-2 % skutečného množství čištěné odpadní vody. [2]

2.1 Složení a vlastnosti čistírenského kalu

Čistírenský kal je suspenzí tuhých látek organického či anorganického typu, které byly obsaženy ve vodě a byly technologicky získány různými typy úpravy odpadní vody. Množství čistírenského kalu je dáno převážně znečištěním vody a volbou způsobu čištění. [3]

Kal obsahuje z převážné většiny organické látky netoxického charakteru (cukry, tuky, bílkoviny atd.), bohatý na fosfor a dusík, mimo jiné se v čistírenském kalu vyskytují zbytky mikroorganismů včetně patogenních látek. Mezi jeho negativa patří ale především obsah toxických prvků těžkých kovů (Pb, Zn, Cu, Cr, atd.), pesticidů, PCB, sloučenin na bázi chlóru, které je potřeba během procesu úpravy kalu odstranit nebo alespoň snížit jejich hodnotu viz **tab.1** (předpis č. 382/2001 Sb. Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě [4]. Stanovuje postup a mezní koncentraci vybraných prvků ČK při použití na zemědělskou půdu).

Riziková látka	Mezní (maximální) hodnoty koncentrací v kalech (mg/kg sušiny)
As – arzén	30
Cd - kadmium	5
Cr - chrom	200
Cu - měď	500
Hg - rtuť	4
Ni - nikl	100
Pb - olovo	200
Zn - zinek	2500
AOX	500
PCB (suma 6 kongenerů - 28+52+101+138+153+180)	0,6

Tab. 1 Maximální hodnoty koncentrací rizikových látek při použití na zemědělskou půdu [4]

2.2 Úprava čistírenských kalů

Úpravou kalů rozumíme energeticky i časově náročný proces snižování obsahu vody, škodlivých látek v kalu za účelem celkové hygienizace před dalším využitím či likvidací. Jak je možné vidět na **obr.1**, kal prochází řadou procesů ke zlepšení jeho kvality a minimalizaci jeho dopadů na životní prostředí.

2.2.1 Primární kal

Vzniká jako produkt primární sedimentace, tj. v usazovacích nádržích. Jedná se zpravidla o nerozpustitelné látky zrnité struktury, které nezachytily česle ani lapák písku a vlivem rozdílných hustot se usazují na dně. Primární kal obsahuje z velké většiny 2,5 až 5 hm.% sušiny. [5]

2.2.2 Zahušťování

K zahušťování kalu dochází v sedimentačních nádržích přidáním flokulantů, za účelem zvýšení koncentrace tuhých látek a snížení obsahu vody. Dochází tak k usazování většího množství pevných látek na dně nádrže, které jsou následně odebírány, kalová voda je opět vrácena do usazovacích nádrží. Obsah sušiny je v rozmezí od 6 do 8 hm. %

2.2.3 Stabilizace

Stabilizační procesy nám slouží k hygienizaci a nezávadnosti výsledného produktu. Rozlišujeme dva základní druhy stabilizací *Aerobní* a *Anaerobní* tudíž bez přítomnosti vzduchu a s jeho přítomností. Mezi nejpoužívanější typy stabilizace patří vápnění, které se provádí za vysokých teplot (190°C), nebo metanizace (vyhňování). Metanizace je využívána především u větších zařízení z důvodu úspory nákladů na ohřev kalu (30 až 55°C) a ke snížení schopnosti kalových částic vázat vodu. Hlavním produktem stabilizace je vzniklá biomasa (vyhnilý kal) a bioplyn (CH₄). [6]

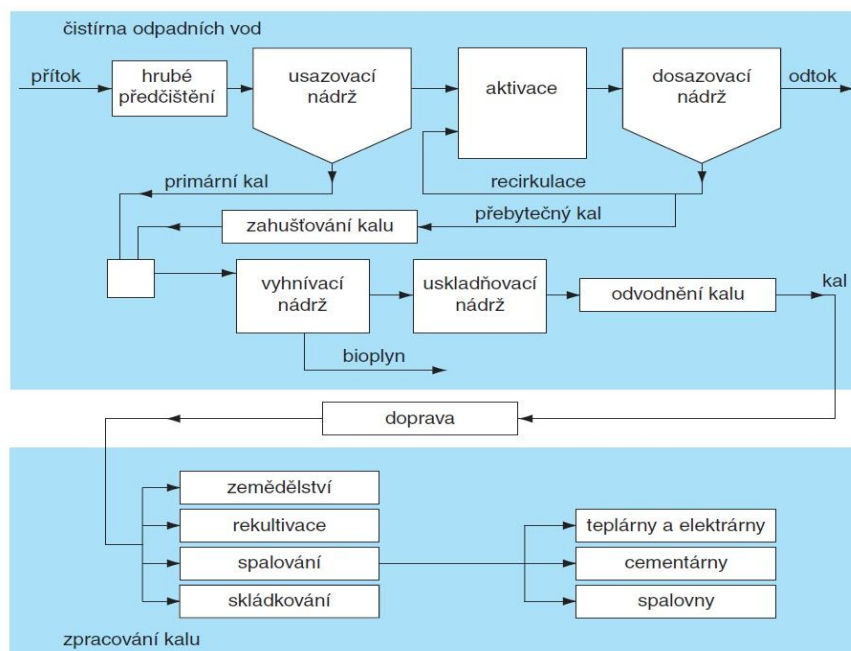
2.2.4 Odvodňování

Odvodňování je proces zbavování kalu zbytkové vody, při kterém se převážně dosahuje sušiny okolo 37 hm. %, v ojedinělých případech lze dosáhnout až 45 hm.%. Tento proces je ve většině případů nedílnou součástí každé ČOV. Mezi nejpoužívanější způsoby patří především:

- **Kalové pole-** Jedná se o betonové nádrže vybavené odtokovým zařízením, odděleném od surového kalu vrstvou šterku a písku. Dochází zde k samovolnému prosakování. Za velmi příznivých letních měsíců lze dosáhnout i obsahu sušiny 65hm.%. Ale vzhledem k velkému množství vynaloženého času a plochy se využívá jen velmi zřídka a to jen v menších zařízeních.
- **Kalolisy-** Jak už napovídá název jde o filtraci za vysokého tlaku, při které se dosahuje obsahu sušiny v rozmezí od 35 až 50 hm.%.
- **Síto pásové lisy-** Nejpoužívanější varianta odvodňování využívající jak volného filtrování, tak i filtrování pod tlakem. Kal je potřeba před vstupem obohatit polykoagulanty z důvodu lepšího odvodnění. Proces spočívá v prostupu kalu na nekonečně dlouhých plachetkách sadou válců, kde je deformován a zbavován vody. Pro anaerobně stabilizovaný kal se udává hodnota okolo 400 kg/m² za hodinu provozu při suchosti až 40 hm.%.
- **Sedimentační centrifugy** - Jde o sedimentační oddělování vody od částic kalu vlivem vysoké odstředivé síly, suchost nabývá hodnot od 15-25 hm.%.

2.2.5 Sušení kalů

Sušení je mechanicko-chemický proces odstraňující přebytečnou vlhkost za působení tepelné energie. Převážně se využívá ohřátého vzduchu ke snížení vlhkosti v kalu, obrovský vliv na nárůst výhřevnosti vlivem snižování obsahu vody a tím příznivý dopad na energetické využití kalů při spalování. Sušením lze získat kal o obsahu sušiny až 95%, což má za následek redukcii až o třetinu původní hmotnosti, zlepšení manipulačních vlastností, transportu a také samotné likvidace. [3], [7] Vysušený kal o tak vysokém obsahu sušiny se využívá především na výrobu pelet, sloužících jako samostatné palivo. Příměsného paliva ve formě zemního plynu a jiných fosilních paliv se využívá jen při zapalování směsi či odstávce zařízení.



Obr. 1 Schéma procesu získávání čistírenského kalu a následného nakládání [8]

3 Hierarchie nakládání s odpady

Vzhledem k hierarchii nakládání s odpadem, která je uvedena v evropské směrnici 74/442/EHS ve znění směrnice 91/156/EHS, by měly členské státy zařadit tento postup do svých strategií nakládání s odpady, aby docházelo k rozvoji ve stejném směru. [9]



Obr. 2 Hierarchie odpadu [10]

Hierarchie podporuje:

1) Předcházení vzniku odpadů nebo vzniku v závislosti na jejich škodlivosti:

- vývoj technologií („čistých“) šetrnějších k životním zdrojům a jejich zavedení do procesu
- technický a marketingový vývoj produktů, které by snižovaly množství a škodlivost odpadu při odstraňování

- vývoj technologií k odstranění nebezpečných látek z odpadu, který je určen k dalšímu použití

2) Nejlepší možné využití odpadu:

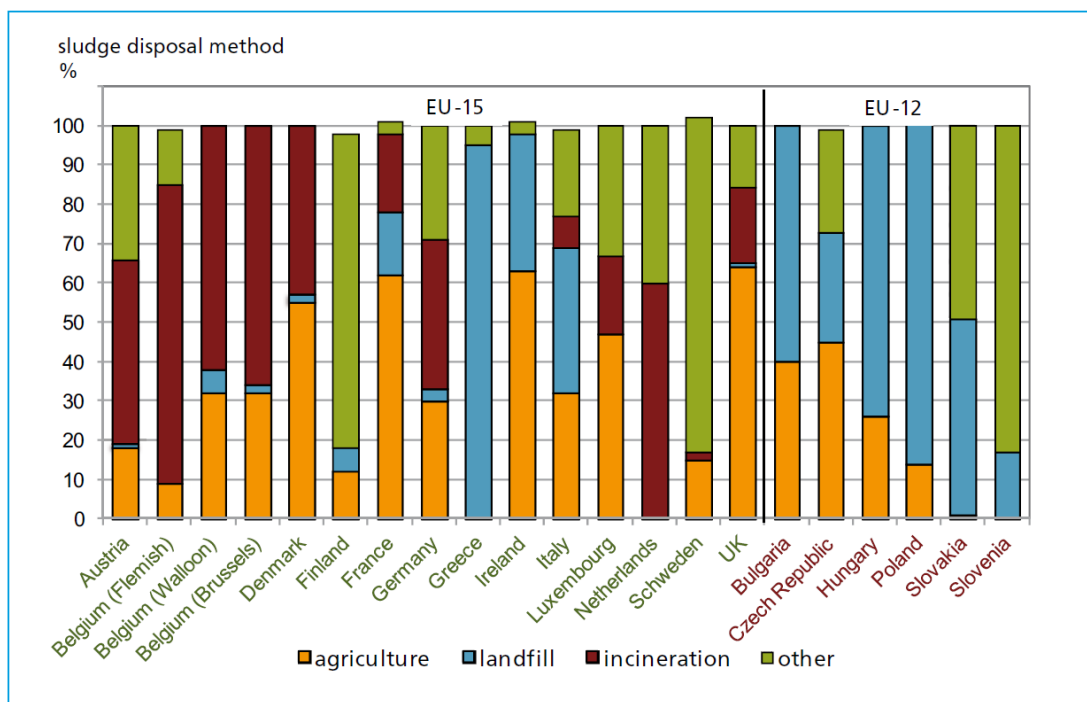
- využití druhotných surovin recyklací, opětovným využitím nebo regenerací
- využití energetického potenciálu
- pokud není možné odpad dále využít, následuje uložení na skládku

Jak je možné vidět na **obr.2**, vrcholem tohoto trojúhelníku je prevence, a to i vrcholem v obtížnosti plnění. Prevence by vyžadovala, aby domácnosti a podniky předupravovaly odpadní vody před jejich vypuštěním, což by bylo nesmírně nákladné. Naopak nejjednodušším bodem hierarchie je skládkování, kterému bychom měli zabránit a využívat tak technologií opětovného využití nebo odstranění za účelem získání energie.

Způsob nakládání s kalem by měl být sestaven na základě porovnání všech dostupných metod a výběrem takové, která především splňuje svou spolehlivostí environmentální, bezpečnostní a ekonomické požadavky. [9]

4 Zpracování a likvidace čistírenského kalu

Nakládání s čistírenským kalem se nám rozděluje do dvou základních skupin a to dle záměru využití nebo likvidace. Jak můžete vidět na **obr.3**, využívání kalů v zemědělství je v dnešní době nejvíce využívanou metodou. Kal je využíván jako obohacující látkou pro půdu z důvodu vysokého obsahu fosforu a dusíku. Další metodou je skládkování, které je v poslední době na ústupu z důvodu zpřísnění kritérií nakládání s odpadem a vzhledem k narůstajícím cenám za uložení odpadu na skládku je toto využití neekonomické. Jako poslední a ze všech metod nejefektivnější, je možnost využít energetického potenciálu kalů při jejich spalování či spoluspalování. Mezi hlavní klad této metody patří, vzhledem k zavedení příslušného čištění spalin, redukce toxických a nebezpečných látek obsažených v ČK. Čímž dochází ke snížení dopadu na životní prostředí.



Obr. 3 Metody nakládání s čistírenským kalem v zemích EU (2000-2006) [11]

Pozn.: (sludge disposal method – metody odstranění kalu, agriculture – zemědělství, landfill – skládkování, incineration – spalování, other – další)

4.1 Skládkování

Skládkováním se rozumí uložení upraveného kalu na skládku, buď jako prozatímní uložení, nebo jako konečné zneškodnění. Kal je následně zavezen množstvím půdy. V některých zemích EU je tento proces zakázán úplně, někde jen upraveny podmínky zabezpečení úniku a následné kontaminace okolí. Proto musí kal před uložením na skládku projít hygienizací, aby nedocházelo k šíření patogenů. U skládkování je hlavním produktem metan a oxid uhličitý. Tyto plyny jsou zachycovány a následně se využívá jejich energetický obsah.

Skládkování v této době v ČR patří k nejjednodušším způsobům nakládání s ČK, ale vzhledem k narůstání cen skládkování a zavedením ekologických daní, tento proces nebude v budoucnu zdaleka levnou záležitostí.

4.2 Využívání kalu v zemědělství

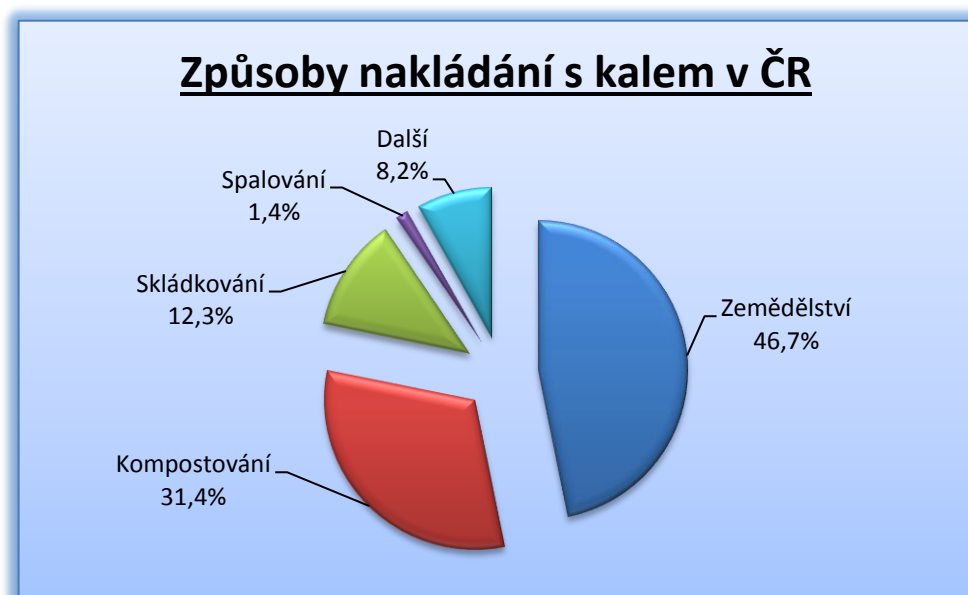
Je pravdou, že využívání kalů v zemědělství je nejrozsáhlejším využitím likvidace a jde také o nejekonomičtější nakládání s kaly z ČOV. Kal je využíván k hnojení v tekutém nebo zahuštěném stavu. [12] Použitím kalů jako hnojiva zvyšujeme plodnost rostlin přidáním živin (N, P, K, Na). Nicméně skutečnost výskytu toxických látek (těžkých kovů, organických chemikálií z farmaceutického průmyslu, hormonálních látek, detergentů, pesticidů) tvoří riziko ohrožení půdních organismů, rostlin a půdní struktury. V neposlední řadě i vodohospodářství vlivem eroze nebo přívalových dešťů. [13]

4.3 Kompostování

Kompostování je procesem přeměny organických látek obsažených v kalu na kompost, který je biologicky nezávadný pro životní prostředí. Konečnými produkty jsou ve velké míře H_2O , CO_2 , vzniklá biomasa a stabilizovaný kal. Využívá se aerobního procesu stabilizace. Kompost lze dále využít jako přírodní hnojivo na městskou zeleň, pásy kolem cest atd. [3]

4.4 Termické využití

V první řadě je potřeba si objasnit o jaký typ termického využití se jedná, zda jde o energetické využití nebo spalování dle zákona o ovzduší (č. 201/2012 Sb.). O energetické využití se jedná tehdy, pokud nepotřebuje odpad po zapálení podpůrné palivo k hoření, nebo pokud je dodáván jako příměs v zařízeních pro výrobu energie [14]. V poslední době bylo zavedeno mnoho nových technologií v oblasti nakládání s kalem, a to převážně vlivem stoupajících nákladů na skladování, či klesání dostupnosti pozemků. Tyto kategorie můžeme zařadit do skupiny termických procesů, pyrolýza, mokrá oxidace, zplyňování a vedoucím této skupiny je spalování [15]. Spalování se do popředí dostalo v převážné většině z důvodu razantního snižování množství kalu.



Obr. 4 Graf závěrečného způsobu využití kalů na území ČR v roce 2009 [40]

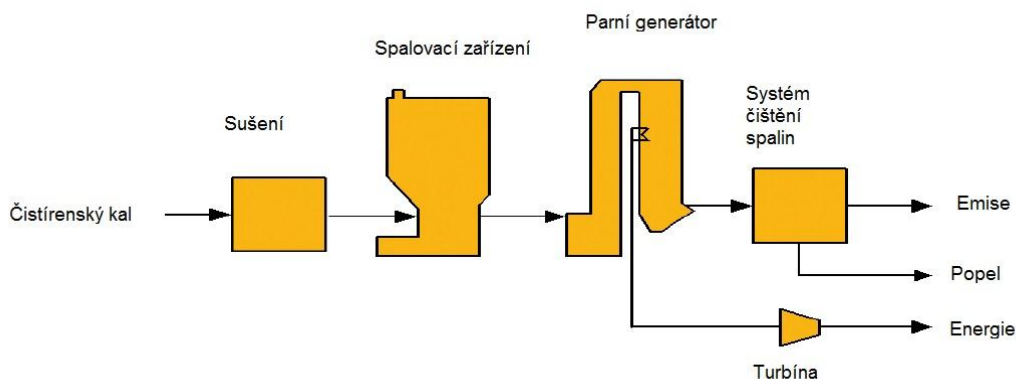
5 Spalování a spolu-spalování čistírenského kalu

Metody termického využití kalu jsou z dosavadně popsaných metod využití ČK považovány za nejefektivnější a pro životní prostředí nejšetrnější. Především z hlediska redukce jeho množství s následným využitím tepelné a elektrické energie vzniklé při procesech spalování.

Zásadním prvkem ovlivňujícím využití ČK ke spalování je v první řadě úspora fosilních paliv. Některé zdroje uvádí úsporu až 1/3 tuny uhlí na 1 tunu vysušeného kalu a 1/5 tuny mazutu. Dalším značným posudkovým parametrem je stupeň odvodnění kalu, na kterém přímo úměrně závisí výhřevnost viz **obr.6.** [14] Proto se u většiny stávajících zařízení ke spalování či spolu-spalování kalů na území EU využívá odvodněných, sušených kalů, či zařazení přede-

hřívacích linek ke snížení obsahu vody v kalu v zařízeních pro spolu-spalování a spalování kalů.

Z ekonomického hlediska je samozřejmě lepší zařadit proces sušení přímo v ČOV, z důvodu úspory nákladů na dopravu snížením objemu kalů. Z hlediska nákladů na provoz je ale sušení kalů využito především ve větších zařízeních, které vlivem zařazení metanizačního procesu na určitém množství kalu jsou schopny snížit náklady vlivem spalování bioplynu.



Obr. 5 Schéma zařízení pro spalování čistírenského kalu [11]

5.1 Výpočet výhřevnosti kalu a stanovení závislosti na obsahu vody v ČK

Chceme-li čistírenský kal termicky zpracovat je pro nás v první řadě důležitý parametr výhřevnosti LHV , nebo-li spalné teplo snížené o kondenzační teplo veškeré vody vzniklé při spalování vodíku, popřípadě dodané v palivu. Na základě zadaných hodnot obsahu paliva viz **tab.2** a koncentrací složek obsažených v hořlavině viz **tab.3**, byl proveden výpočet výhřevnosti kalu a stanovení výsledné závislosti na obsahu vody viz **obr.6**. Na základě tohoto výpočtu jasně vyplývá, že proces snižování obsahu vody v ČK je pro následné termické využití nezbytný vzhledem k energetické soběstačnosti. Výpočet byl proveden za pomoci MS Excel.

Složky paliva		ASK kal 55%VL
Hořlavina	[%hm]	0,23
Voda	[%hm]	0,35
Popeloviny	[%hm]	0,42
celkem		100%

Tab. 2 Podíl složek paliva v kalu ASK 55% VL

Složky paliva		ASK kal 55%VL
C	[%hm]	73,91
H	[%hm]	5,9
N	[%hm]	0,71
O	[%hm]	17,95
S	[%hm]	1,53
Cl	[%hm]	0
celkem		100%

Tab. 3 Koncentrace složek paliva v hořlavině kalu ASK 55% VL

Výpočet spalného tepla hořlaviny dle (Institute of Gas Technology (1990):

$$HHV_h = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120(O_h - N_h) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (1)$$

Výpočet spalného tepla paliva:

$$HHV = HHV_h(1 - A - W) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (2)$$

Přepočet spalného tepla paliva na výhřevnost:

$$LHV = HHV - r_{H_2O} \cdot W_{celk} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (3)$$

Celkové množství H_2O , které přejde z paliva do spalin:

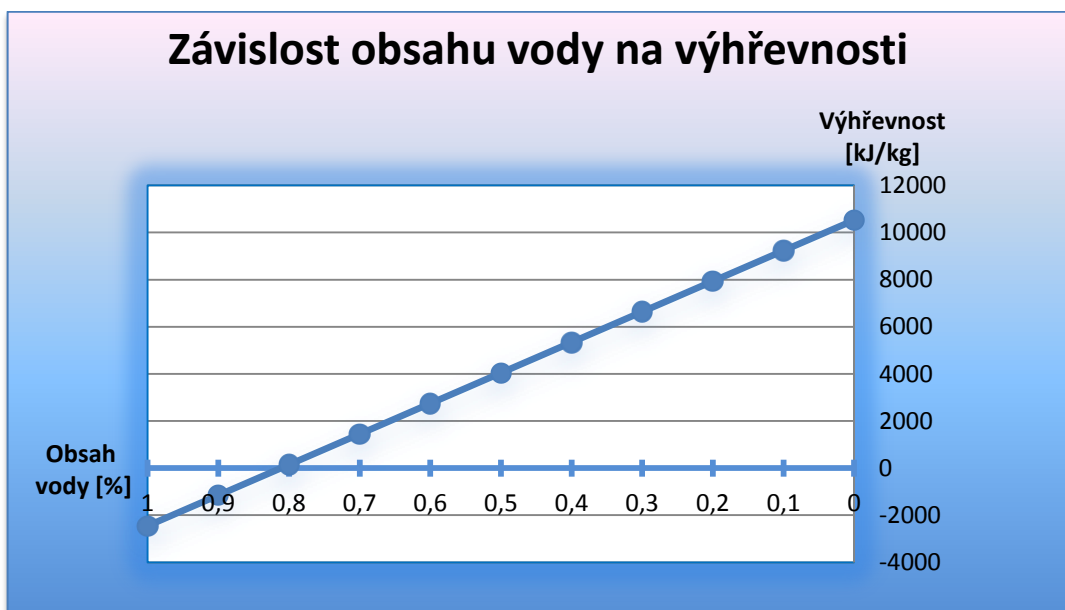
$$W_{celk} = W_p + \frac{MW_{H_2O}}{MW_{H_2}} \cdot x_{H, korig} \cdot B_p \quad [\text{kg/kg}] \quad (4)$$

Korekce spalného tepla na výhřevnost :

$$x_{H, korig} = H_h - \left(\frac{MW_{H(1)}}{MW_{Cl}} \cdot Cl_h + \frac{MW_{H(1)}}{MW_F} \cdot F_h \right) \quad [\text{hm. zlomek}] \quad (5)$$

Vypočítané hodnoty		
Spalné teplo hořlaviny	31039,8	[kJ/kg]
Spalné teplo paliva	10983,1	[kJ/kg]
Výhřevnost	10525,2	[kJ/kg]

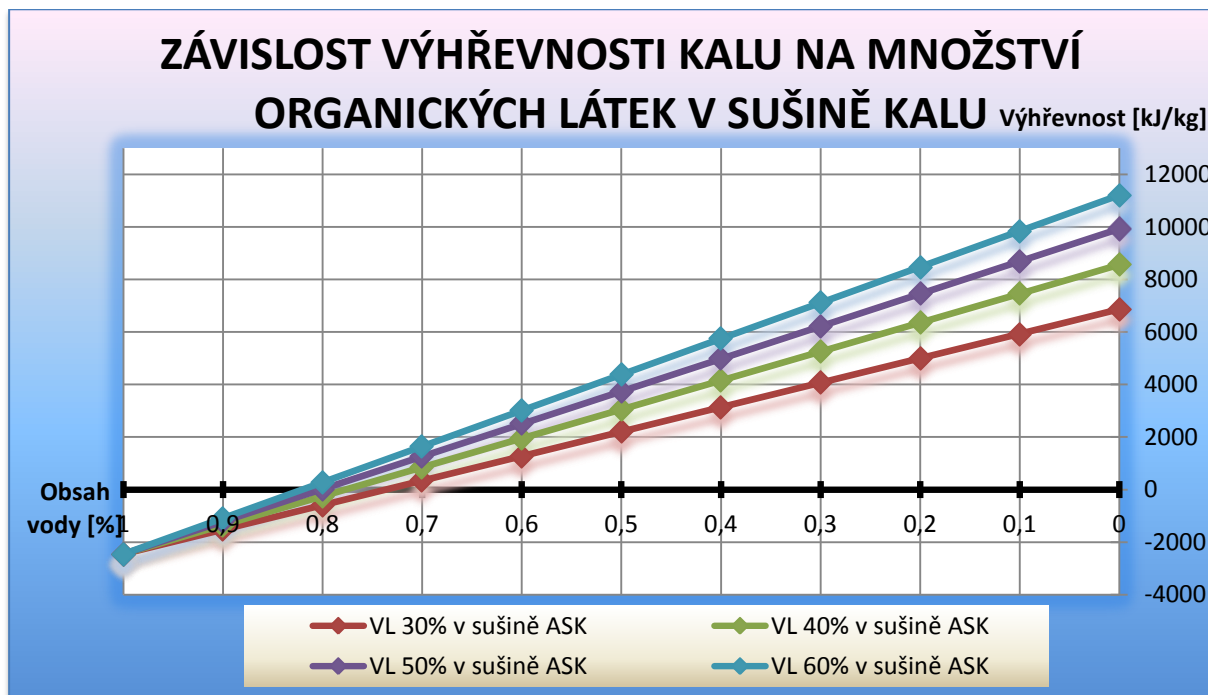
Tab. 4 Vypočítané hodnoty spalného tepla a výhřevnosti kalu ASK 55% VL



Obr. 6 Graf závislosti obsahu vody na výhřevnosti kalu ASK 55% VL

Jak je možné vidět na **obr.6** kal při obsahu vody nad 80% musí být z energetického hlediska dotován energií, neboť jeho výhřevnost klesá do záporných hodnot. Vzhledem k této skutečnosti je nutností snížit obsah vody pod tuto hranici, aby nedocházelo při spolu-spalování kalu po přivedení do spalovací komory k hasicímu účinku.

Dalším důležitým parametrem je obsah organických látek (sušiny), který přímo závisí na výtěžnosti energie z kalu. Na základě vstupních hodnot a jejich přepočtu byla stanovena závislost výhřevnosti na množství organických látek v sušině kalu viz **obr.7**. Vzhledem ke stoupající výhřevnosti kalu vlivem obsahu organických látek je pro spalování výhodnější zařazení kalů bez předchozího vyhnívání (metanizace), neboť metanizací snižujeme množství organických látek, které přechází na bioplyn.



Obr. 7 Graf závislosti výhřevnosti kalu na množství organických látek v sušině

Spalování nevyhnilých kalů by i po ekonomické stránce bylo přijatelnější a to vzhledem k odstranění nákladů na ohřev při metanizačním procesu, a vytěžením tak většího množství energie spalováním tzv. "hodnotnějšího" paliva.

Výsledné hodnoty vypočítaných parametrů a výsledné výhřevnosti kalu dle obsahu organických látek jsou uvedeny v příloze 2 (Tab. 7-11).

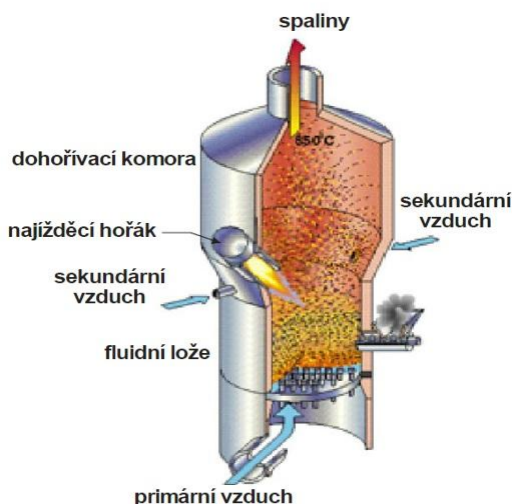
5.2 Hlavní typy spalovacích pecí

5.2.1 Spalování ve fluidní vrstvě

Fluidní vrstva zaujímá přední postavení, pokud jde o přímé spalování kalu. Využitím této technologie je možné spalovat jak kvalitní paliva s menší teplotou spalování a zabránit tak v uvolňování těkavých látek, ale především se jedná o spalování i nekvalitních paliv, kterými jsou například ČK. Palivová směs musí být namleta na co nejmenší částice z důvodu zvýšení účinnosti pece.

Výhodou zařazení fluidních pecí při spalování kalu je především snížení NO_x a malého množství CO , následně vzniklý popílek je možné využít ve stavebnictví či v důlním průmyslu jak je tomu například v Německu. Popel ze spodní části pece, kterého je podstatně menší množství může být smíchán spolu s popílkem, nebo uskladněn bez další úpravy na skládku. [16]

Spalovací komora je konstruována jako cihlová pec válcového tvaru s roštem ve spodní části pece. Požadovaný spalovací vzduch je vháněn do spalovacího prostoru roštem. Pro snížení škodlivých příměsí plynu, které jsou typické pro tuto metodu je v horní části pece přiváděn sekundární vzduch. Pec je složena z vrstvy inertního materiálu (z většiny se jedná o písek), který je přiváděn do pece a vlivem proudícího vzduchu vytváří vznášející se vrstvu (fluidní lože). Spalovací teplota se pohybuje mezi $800\text{--}900^\circ\text{C}$. Kal přiváděný z horní části se vlivem sušení rozpadá na malé kousky a ty po vznícení shoří. Jemné části vzniklého popele jsou zachycovány v cyklonech či elektrostatických odlučovačích (ESP), hrubé částice jsou odváděny spodní částí lože. [11]

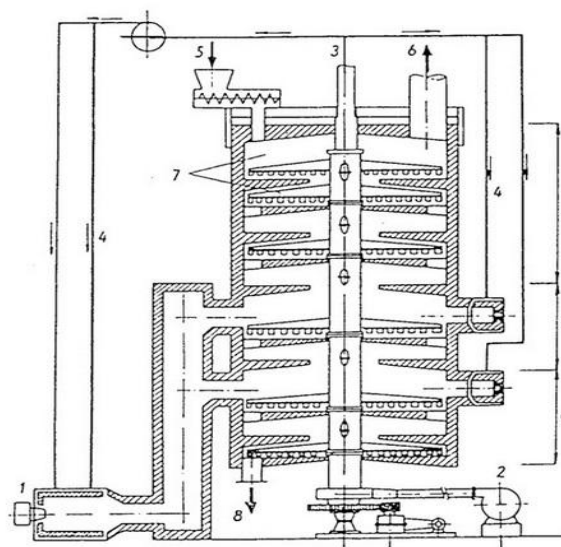


Obr. 8 Fluidní lože [14]

5.2.2 Spalování v etážových pecích

Etážové pece jsou konstruovány jako válce využívající postupného průchodu spalovaného média patry (etážemi), které jsou přivařeny na vnitřní stěně. Kal je dávkován na horní patro, kde je pomocí lopatek uložených na hřídeli postupně dopravován na nižší patro. Vlivem postupného průchodu dochází ke značnému zdržení média v peci, tudíž k postupnému sušení vlivem odcházejících spalin, vznícení a následného spálení.

V dnešní době se využívá především kombinací etážových pecí s fluidní vrstvou, za účelem lepšího vysušení kalu během setrvání na etážích. Tím dochází ke zvýšení účinnosti pece.



a – sušicí pásmo; b – spalovací pásmo; c – chladicí pásmo;
1 – přidavné spalování odpadních kapalných paliv, 2 – ventilátor chladicího vzduchu,
3 – výstup ohřátého vzduchu, 4 – ohřátý vzduch do hořáků,
5 – přívod odpadního materiálu, 6 – odvod plyných spalin, 7 – etáže sušicího pásma
8 – odvod tuhých zbytků po spalování

Obr. 9 Schéma spalování v etážové peci [17]

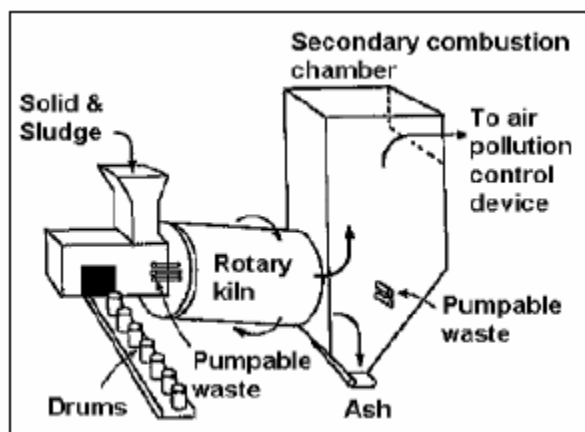
5.2.3 Spalování na roštových pecích

Tato technologie je jedna z nejvíce pokročilých technologií spalování odpadu. Tudiž ji lze zapojit ke spalování ČK za účelem energetického využití, jako k tomu dochází například v Dánsku a Švédsku. [11]

Na rozdíl od fluidní pece je kal přiváděn na roštu, kde dochází postupným průchodem nejprve k vysušení vlivem vysoké teploty ve spalovací komoře, následnému vznícení a spálení. Vzduch je primárně přiváděn ze spodní části roštu a ve druhé fázi nad rošt. Nevýhodou tohoto zařízení je především nižší teplota spalování.

5.2.4 Spalování v rotačních pecích

Rotační pec je tvořena válcem s vnitřní vyzdívkou z nehořlavého materiálu chránícího vnější plášť pece a dohořivací komorou. Pec je mírně nakloněná z důvodu postupu spalovaného odpadu pecí. Pozvolným otáčením dochází k přepadávání směsi na protilehlé stěny, čímž dochází k dostatečnému míšení se vzduchem. Pozvolným postupem pecí je zaručené vysušení a následné vznícení a spálení směsi. V rotačních pecích se dosahuje teplot až okolo 1200°C, vlivem tak vysoké teploty dochází k redukci oxidu uhelnatého a k jeho přeměně na oxid uhličitý.



Obr. 10 Schéma systému spalování v rotačních pecích [18]

Pozn.: (Solid & Sludge – tuhý odpad a kal, Drums – sudy, Pumpable waste – odpady k čerpání, Rotary kiln – rotační pec, Ash – popel, To air pollution control device – odchod do systému čištění spalin, Secondary combustion chamber – Sekundární spalovací komora)

5.3 Druhy spolu-spalování čistírenských kalů

Úplného spálení směsi dosáhneme dodržáním tří základních parametrů (pravidlo „3T“). [19]

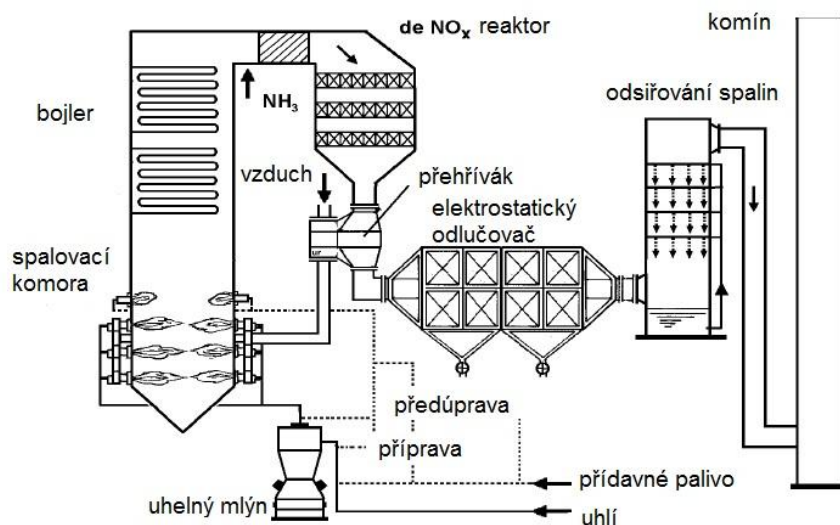
- dostatečné doby setrvání v peci
- řízením dostatečně vysoké teploty
- určitého stupně turbulence

5.3.1 Spolu-spalování v elektrárnách a teplárnách

Využití čistírenského kalu jako přídavného paliva v elektrárnách je v evropských zemích běžnou situací nakládání s čistírenským kalem. Důvodem využití této technologie jsou především nízké náklady spojené se zavedením do provozu. Nutností je především zahrnutí dopravníku na zásobování spalovacího zařízení a skladovacích prostor pro uskladnění kalu. Změny bude nutné provést ale i v systému čištění spalin, jelikož nedostačuje ke splnění emisních limitů.

Při spolu-spalování je ČK dávkován do spalovacího zařízení spolu s primárním palivem (hnědé nebo černé uhlí). Kal je přiváděn do mlecího zařízení, kde se mísí s uhlím a tvoří tak jemnou spalovací směs, která je následně sušena proudem horkých spalin. Směs je dopravována z mlýnu pomocí horkého vzduchu a poté tryskou vháněna do spalovací komory. Spalovací teploty se pohybují v rozmezí od 1200°C do 1400°C, v závislosti na druhu primárního paliva.

Obsah ČK ve vzniklé směsi obsahuje od 1% až do 5% hmotnosti primárního paliva. Takto malé množství ČK nemá dopad na proces hoření. Ovlivňujícími parametry je především obsah vody v kalu a jeho poměr ku sušině, dále také obsah spalitelných látek.



Obr. 11 Schéma spolu-spalování v elektrárnách se systémem čištění spalin [20]

5.3.2 Spolu-spalování v cementářských pecích

Tato metoda je na průmyslové sféře považována za nejužitečnější jak z energetického hlediska, tak i v případě ochrany životního prostředí. Pro spalování kalu v těchto zařízeních je ale nutností kal vysušit přibližně na hodnotu 90% obsahu sušiny, což vede k velkému množství spotřebované energie.

Cementárny využívají ke spalování nebezpečného odpadu rotačních pecí, vzhledem k faktu zakomponování odpadu vzniklého při spalování kalu do slinku se jedná o tzv. "bezodpadovou technologii" zpracovávající ČK. Výhodou této metody spolu-spalování je v přední míře využívání vysokých teplot, čímž dochází k rozpadu chemických sloučenin a transformaci těžkých kovů do slinku.

Postup se skládá z drcení vápence, spolu-smíchání s čistírenským kalem a následného vypálení v peci. Před vstupem do pece je směs kontinuálně předehřívána (800-850 °C), poté přiváděna do pece, vlivem vysokých teplot (1800-2000 °C) dochází ke spálení kalu, rozpadu chemických sloučenin v kalu a jejich transformaci do slinku. Poté dochází k ochlazení vzniklého slinku proudem spalin na teplotu 850°C. Vzhledem k vysoké produkci prachových částic obsažených ve spalinách, se k odstranění využívá v cementárnách především elektrostatických odlučovačů (ESP) a to především vlivem jejich vysoké účinnosti. [21]

Nevýhodou tohoto procesu je již zmíněný problém ohledně velkého množství spotřebované energie na sušení a nutnost zařazení lepšího systému čištění spalin. Jak už bylo zmíněno kal je považován za odpad, tudíž je nutností zařadit technologii čištění spalin na úrovni spaloven odpadu.

5.3.3 Spolu-spalování čistírenských kalů ve spalovnách odpadu

Proces spočívá ve spolu-spalování ČK s tuhým komunálním odpadem, hlavním cílem je redukce nákladu na spalování odpadu a ČK spojením v jeden proces využívající obou složek najednou. Výhodou tohoto procesu je produkce tepelné energie. Nezbytným stanoviskem k tvorbě tepla je odpaření vody z ČK, které je podporováno spalováním tuhého odpadu a kalu. Hoření směsi poskytuje nadbytek tepla k tvorbě páry pro generátor. [22]

Každá linka určená ke spalování odpadu je dle směrnice 2000/76/EC vybavena jedním nebo více hořáky, které při poklesu teploty pod 850 °C sepnou a zvednou teplotu nad tuto hranici. Souběžně se sepnutím hořáků se automaticky zastaví přísun kalu. Vzhledem ke spalování odpadu spolu s kalem je nutné brát v potaz dvě zásadní omezení. Prvním omezením je hmotnostní zatížení roštu a tepelné zatížení pece, pec by měla být konstruována s jistými rezervami především v teplotním zatížení mezi komorou a výměníkem tepla. Další omezení nastává v systému čištění spalin, který by měl být konstruován na větší zatížení vlivem nárůstu objemu spalin, spojeném se spalováním ČK. [19]

Základní fáze přeměny při spolu-spalování ČK a odpadu [19]:

- v první fázi probíhá sušení odpadu spolu s kalem horkými plyny a uvolňují se tak těkavé látky s nízkou zápalnou teplotou;
- následně dochází ke spalování během postupného průchodu pecí;
- v posledním kroku se tvoří struska, která je odebírána ze spodní části pece a poté ochlazována

Z hlediska využití jako primárního paliva komunálního odpadu, je systém čištění spalin vzhledem k nastaveným emisním parametrům na vysoké úrovni, ale jak už bylo zmíněno, bude nutností nastavení na větší zatížení. Spalovny odpadu budeme tudíž muset vybavit dopravním a skladovacím zařízením ČK.

5.4 Nutné změny stávajících zařízení

Zařízení ke spolu-spalování jsou obvykle vybaveny primárním skladovacím a dopravním zařízením, zaručující dopravu primárního paliva do spalovacího prostoru.

Dle typu paliva jsou skladovací prostory (bunkry) vybaveny odvětrávacím zařízením z důvodu tvorby zápachu či exhalace jedovatých plynů. Dopravním zařízením pro přísun primárního paliva jsou z větší části pásové, šnekové a jiné dopravníky. Nedílnou součástí zařízení je také systém čištění spalin. Nastavení systému či zařazení speciálních technologií se odvíjí dle palivové směsi.

Vzhledem ke spalování primárního paliva spolu s ČK je nutné zavést řadu změn vlivem zařazení kalů jako odpadu. Proto v následujících sekcích budou popsány prvky, které je nutné zabudovat do stávajících zařízení.

Skladovací zařízení

Skladovací zařízení lze rozdělit dle konzistence ČK na skladování vysušených kalů v bunkrech a kapalných kalů (neodvodněných). Neodvodněný kal je skladován v cisternách, odkud je pomocí čerpadel přepravován. Větším zástupcem jsou kaly odvodněné, popřípadě vysušené, k jejichž skladování se po přepravě využívá tzv. bunkrů. Jde o vyzdžené nádoby vysokokapacitních rozměrů vybavené systémem odvětrávání plynů a par, ty jsou následně využívány jako primární zdroj vzduchu při spalování.

Dopravní zařízení

Zařízení pro dopravu ČK je vlivem malého množství spalovaného kalů spíše nekontinuální. Sestává z jeřábu dávkujícího ČK na pojezdové zařízení dopravující kal do zásobníku umístěného poblíž spalovací komory. Vzhledem k postupu přivádění paliv do spalovací komory je konstruován zásobník. V případě kontinuálního plnění pece je možné využít šnekových a jiných dopravníků či zařízení uvedených v normě TNI CEN/TR 13768.

Zařízení k čištění spalin

Vlivem spolu-spalování ČK lze předpokládat nárůst v podobě oxidů dusíku, zvýšení obsahu plyných těžkých kovů především obsahu As, se kterými se může vyskytovat i rtuť a samozřejmě i k většímu množství TZL. Vzhledem k tomuto faktu bude nutností nastavení systému čištění spalin na největší možný objem vytvořený v závislosti na spalovaném palivu, především ve spalovnách odpadu a u elektráren z důvodu nižší teploty spalování.

6 Legislativa

Čistírenský kal jakožto sloučenina obsahující řadu toxických látek (As, Cd, Cr, Hg, Pb, PCB a PCDD/F) spadá do kategorie odpadů. Z tohoto hlediska je nutností provozovatele ČOV, či provozovatelů zařízení ke zpracovávání a nakládání s ČK postupovat dle platných zákonů a nařízení ohledně nakládání s odpadem. Vzhledem k trendu využívání energetického potenciálu ČK spalováním, spolu-spalováním, nebo jinými termickými postupy, je nutností zahrnout i požadavky platné legislativy o ochraně ovzduší stanovující přípustné emisní a imisní limity, které musí být striktně dodrženy.

Hlavními prameny ovlivňujícími způsob jak už nakládání s odpadem nebo jeho následné využití musí splňovat určitá ekologická kritéria, která jsou v plném souladu s legislativním rámcem ČR a Směrnicemi Evropského Parlamentu a Rady.

Předpis č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. [23] Dle §12 tohoto zákona je prvotní původce odpadů povinen nakládat s odpadem podle způsobů stanovených v tomto zákoně a využívat jen zařízení určených k nakládání s odpady, aby bylo zamezeno ohrožení lidského zdraví a dopadů na životní prostředí. Při nakládání s odpady nesmí docházet k překročení limitů stanovených spolu-souvisejícími zákony o ochraně životního prostředí.

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích [24] stanovuje jednotný integrovaný postup ochrany a prevence životního prostředí, za účelem ochrany životního prostředí jako celku. Vlivem tohoto postupu je stanoveno pravidlo zahrnující stejné emisní limity pro spolu-spalování odpadu v zařízeních určených původně k tomuto účelu.

Dle zákona č.201/2012 Sb. [25] o ochraně ovzduší, který je v souladu se Směrnicí Evropského Parlamentu a Rady 2010/75/EU se ochranou rozumí postup snižování jak rizika dopadu na zdraví obyvatelstva, tak snížení látek ovlivňujících svým neblahým účinkem zemský ekosystém. Vyhláška 415/2012 Sb. stanovuje přípustné koncentrace látek vypouštěné do ovzduší viz **tab.5.**

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg/m ³]
tuhé znečišťující látky (TZL)	≤2500	200
	>2500	150
oxidy síry vyjádřené jako oxid	>20000	2500
siřičitý		
oxidy dusíku vyjádřené jako oxid	>10000	500
dusičitý		
oxid uhelnatý	>5000	500
organické látky vyjádřené jako	>3000	150
celkový organický uhlík (TOC)		
amoniak a soli amonné	>500	50
vyjádřené jako amoniak		

Sulfan	>100	10
Sírouhlík	>100	20
chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	>100	10

Tab. 5 Obecné emisní limity (Příloha č. 9 k vyhlášce č. 415/2012 Sb.)

U spalování dvou a více paliv současně se stanovují hodnoty koncentrací na základě přiřazení specifického emisního limitu každému palivu, následně se vynásobí tyto hodnoty tepelným příkonem každého paliva a součin je podělen součtem tepelných příkonů paliv. [26]

Stanovení přípustného množství (PCDD/PCDF) je nutné (dle vyhlášky 415/2012 Sb. [26]) po sečtení vynásobit koeficientem ekvivalentu toxicity uvedeného v **tab. 6**, tato hodnota musí být při jednorázovém měření menší než 0,1 ng TEQ.m-3.

	Koeficient ekvivalentu toxicity
2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin (TCDD)	0,1
1,2,3,7,8-Pentachlordibenzodioxin (PeCDD)	0,5
1,2,3,4,7,8-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,6,7,8-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,7,8,9-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1,2,3,4,6,7,8-Heptachlordibenzodioxin (HpCDD)	0,01
Oktachlordibenzodioxin (OCDD)	0,001
2,3,7,8-Tetrachlordibenzofuran (TCDF)	0,1
2,3,4,7,8-Pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,5
1,2,3,7,8-Pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,05
1,2,3,4,7,8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)v	0,1
1,2,3,6,7,8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,7,8,9-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
2,3,4,6,7,8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1,2,3,4,6,7,8-Heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
1,2,3,4,7,8,9-Heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
Oktachlordibenzofuran (OCDF)	0,001

Tab. 6 Ekvivalenty toxicity dibenzodioxinů a dibenzofuranů [26]

7 Systém čištění spalín

Během procesu spalování nám kromě vzniklého tepla dochází i k tvorbě spalín obsahujících zbytky vyhořelého paliva ve formě popílku a nebezpečných látek v plynném stavu (emisí). Všechny prvky uvedené jako zdraví škodlivé je nutné před uvolněním do atmosféry podrobit sledu po sobě jdoucích operací, z důvodu odstranění či snížení množství na přípustnou hranici obsahu vypouštěných látek do ovzduší. Postupy jsou stanoveny zákonem o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. a vyhláškou 415/2012 Sb. stanovující mezní koncentrace látek vypouštěných do ovzduší viz **Tab.5**. Mimo jiné obsahuje také nároky ohledně monitorování a vedení procesu spalování, způsob nakládání se vzniklým odpadem ze systému čištění spalín atd. [23]

Systém čištění spalín ze spaloven kalů je v převážné míře stejný jako u spaloven odpadů. Ale vzhledem k tvorbě většího množství oxidů dusíku (NO_x) a existence rtuti je nutné brát na tyto složky ohled a zařadit postup pro jejich snížení. V Nizozemsku se tento problém řeší přidáním amoniaku během spalování, dochází tak k razantnímu snížení emisí NO_x z 100-200 mg/Nm^3 na méně než 70 mg/Nm^3 . [18]

7.1 Znečišťující látky

Znečišťující látky vzniklé procesem spalování:

- Tuhé znečišťující látky (TZL)
- Oxidy dusíku (NO_x)
- Oxid uhelnatý (CO)
- Oxidy síry (SO_x)
- Polychlorované dibenzodioxiny a furany (PCDD/F)
- Těžké kovy

Tuhé znečišťující látky (TZL)

Jde o směs popílku a solí, které jsou vlivem malých rozměrů unášeny proudem spalín z procesu spalování. Hlavním činitelem ovlivňujícím nutnost odstranění těchto látek je především vysoká afinita dioxinu, furanů a těžkých kovů, ulpívajících na povrchu TZL, v závislosti na velikosti měrného povrchu částice. Z tohoto hlediska jsou TZL považovány za nejškodlivější složku procesu spalování. Tyto sloučeniny pak spolu s dehtem a sazemi způsobují nánosy na spalínovém potrubí, čímž může docházet ke korozi. K zachytávání TZL se využívá odlučovačů, cyklonů nebo filtrů. [27]

Oxidy dusíku (NO_x)

V procesu spalování můžeme zaznamenat především dvě základní skupiny oxidů dusíku (palivový NO_x a termální NO_x), které mají svou kyselostí či toxicitou neblahý účinek na životní prostředí a na zdraví organismů. Palivové oxidy dusíku procházejí složitou přeměnou v závislosti na chemickém prostředí, buď na NO_x , nebo na elementární dusík. Spolu se spalovacím vzduchem přichází i atmosférický dusík, ten se dále mění na již zmíněný termální NO_x . [18]

Oxid uhelnatý (CO)

Nedílnou součástí procesů hoření je především vznik CO, který je vysoce jedovatý a vlivem schopnosti vázat se na červené krvinky dochází k zablokování okysličování organismu. Tvorba tohoto plynu je dána nedokonalým procesem spalování. K zabránění produkce CO je nutné zvýšení obsahu kyslíku, teploty hoření a dostatečné setrvání při vysokých teplotách. Vlivem splnění těchto tří parametrů dochází k rozpadu CO na oxid uhličitý (CO₂).

Oxidy síry (SO_x)

Jde převážně o oxid siřičitý a při nižších teplotách i o oxid sírový (SO₂, SO₃), vznikající jako vedlejším produkt oxidace z paliva. Část těchto sloučenin zůstává v popelovinách z důvodu neúplné oxidace. [27]

Polychlorované dibenzodioxiny a furany (PCDD/F)

Dioxiny a furany jsou svým složením vysoce toxické a považovány také za karcinogeny. Do procesu spalování jsou přiváděny spolu s odpadem, nebo mohou vzniknout v průběhu spalování například z odpovídajících prekurzorových látek na bázi chlóru. PCDD/F nejsou specifické pouze jen pro spalování, ale také pro všechny způsoby termického využití. PCDD/F přiváděné spolu s palivem lze během procesu spalování odstranit vlivem vysoké teploty a zajištění odpovídajících podmínek při spalování. Dioxiny a furany vzniklé při procesu spalování jsou vlivem navázání na TZL částečně zachycovány ve filtračních aparátech (rukávcové filtry), či elektrostatických odlučovačích. [18] Mezi další metody odstraňování dioxinů patří katalytická metoda DeNO_x/DeDiox, jedná se o kombinaci katalytické redukce (DeNO_x) a katalytické oxidace (DeDiox). Další možností je absorpční čištění za pomoci nástřiku aktivního uhlí do spalin s následným zachycením na filtrech.

Těžké kovy

Těžké kovy se vyskytují v procesu spalování jak v tuhé fázi tak i plynné. Na jejich významnosti přidává fakt, že řada těchto látek je karcinogenního charakteru a proto je nutností tyto látky odstranit. Mezi nejvýznamnější patří kadmium, olovo, rtuť, kobalt, arsen, chrom a jiné. Specifickou vlastností těchto látek je schopnost vázat se na prachové částice, tudíž se pro odstranění využívá elektrostatických odlučovačů, které mají vzhledem k jemnosti částic výbornou účinnost, či rukávcových filtrů. Pro zachycování těžkých kovů v plynné fázi se využívají Remedial D/F katalytické filtry, SCR či zařazení mokrého čištění spalin.

7.2 Zařízení k odstranění škodlivin

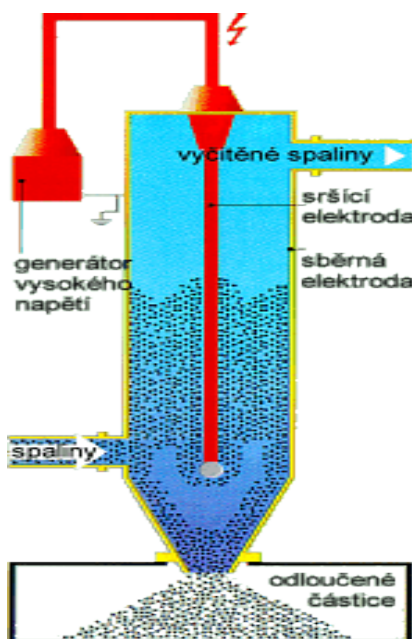
Tyto zařízení slouží k zachycení výše uvedených látek škodlivého charakteru před jejich výstupem z komínového průduchu a jejich následného znečištění ovzduší a neblahého dopadu na zdraví organismů. Během průchodu těmito zařízeními jsou spaliny podrobeny řadě mechanických a fyzikálně-chemických operací. Další druhy zařízení využívaných v procesech čištění spalin popisuje Ing. Kropáč [27] a dokument BREF [18].

Mezi nejběžnější zařízení k zachycování nebezpečných látek patří především filtry a cyklóny. Filtry jsou užívány z velké většiny vlivem kombinace nízké ceny a vysoké účinnosti. Vyrábí se na bázi textilních, keramických a jiných typů vláken, využívají se k zachycování TZL a látek na ně navázaných (těžké kovy, PCDD/F). Vlivem zanášení filtru dochází ke zvyšování účinnosti zařízení, ale také k nárůstu tlakových ztrát. Po zanesení jsou filtry čištěny vibrační či zpětným rázem vzduchu. Druhým ze zmíněných jsou cyklóny či multicyklóny, ve kterých vlivem vířivého toku spalin dochází ke koncentraci prachových částí na stěnách cyklónu a vlivem gravitační síly k jejich hromadění ve sběrném prostoru pod cyklónem.

V následujících odstavcích budou popsány nejvýznamnější zařízení ke snižování emisí na předem stanovené hodnoty dané místní legislativou.

Elektrostatické odlučovače (ESP)

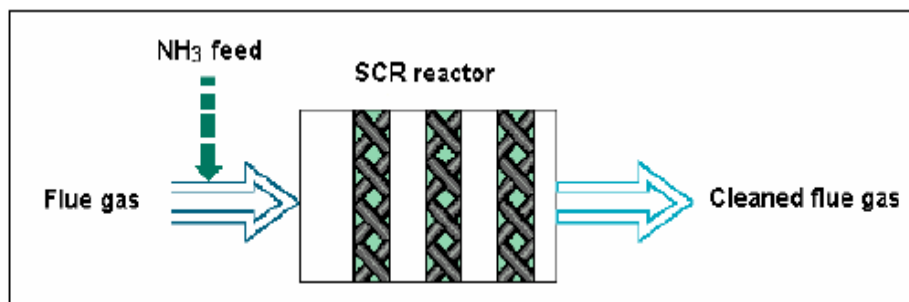
Elektrostatické odlučovače patří k nejlepším zařízením na zachycování tuhých látek (popílku) unášených proudem spalin ze spalovacího prostoru. Princip spočívá v nabíjení tuhých částic elektrostatickým polem vytvářeným sršící elektrodou, která dává částicím záporný náboj. Částice jsou následně přitahovány na kladně nabitě desky umístěné na vnější straně trubky. Nános tuhých částic je následně oklepán a zachycen do sběrného koše. Zařazením této technologie je možné dosáhnout účinnosti okolo 99%.



Obr. 12 Schéma elektrostatického odlučovače [28]

Selektivní katalytické filtry (SCR)

SCR slouží k odstranění NO_x a při zařazení vícevrstvých systémů lze zachycovat i PCDD/F. Proces spočívá v přidání močoviny či amoniaku se vzduchem přímo do spalin a následném průchodu katalyzátorem. Katalytické filtry se většinou zařazují až za procesem odprášení a odsíření a nutností je tak zvýšení teplot ($180\text{--}450^\circ\text{C}$) z důvodu lepšího odstranění NO_x (až 90%). Z tohoto hlediska je nutné vynaložení energie k opětovnému ohřevu spalin. [18]

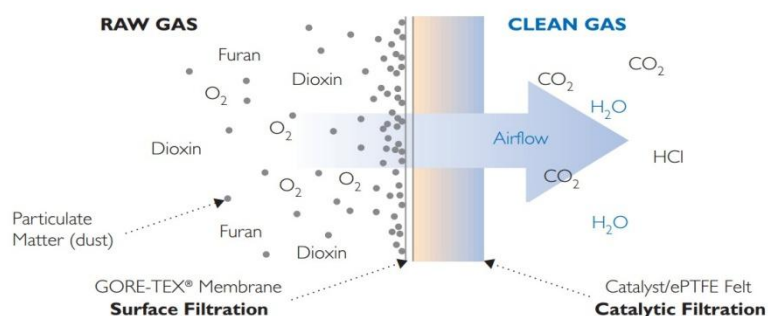


Obr. 13 Schéma provozního principu SCR [18]

Pozn.: (*Flue gas* – spaliny, *Feed* – dodávání, *Cleaned flue gas* – čisté spaliny)

REMEDIA D/F katalytické filtry

Jde o zařízení využívající kombinace povrchového a katalytického čištění spalin. Remedie filtry se skládají z GORE-TEX membrány zachycující jemné prachové částice na povrchu filtru a plstěného materiálu obsahujícího chemicky aktivní vlákna obohacená katalytickým činidlem. Plyny procházející tímto filtrem vyvolávají katalytickou reakci, při které dochází k rozložení PCDD/F na neškodné plynné látky CO_2 , H_2O a HCl . Prachové částice jsou zachycovány v násypce filtračního zařízení. Provozní teplota těchto filtrů je od 160- 260°C. Účinnost těchto zařízení se pohybuje okolo 90%. [29]



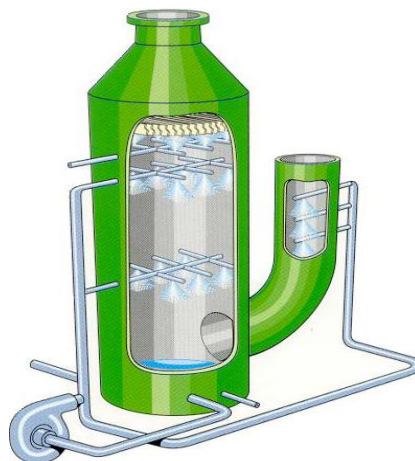
Obr. 14 Schéma čištění spalin REMEDIA D/F katalytickými filtry [29]

Pozn.: (*Raw gas* – nečištěné spaliny, *Particulate matter (dust)* – prachové částice, *Airflow* – proudění, *Clean gas* – vyčištěný vzduch)

Absorpce

Absorpce neboli mokré čištění spalin je charakterizováno difúzním přechodem plynných látek do kapaliny. Absorbentem je kapalina na bázi vody obohacená absorpčním činidlem ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH). Absorpce se využívá především k odstranění SO_2 , HCl , HF . Mezi nejznámější aparáty mokrého čištění spalin patří [30]:

- Quencher (ochlazování spalin absorpčním roztokem tzv. zkrápění)
- Venturiho trubice (vytvoření disperzního roztoku vlivem urychlení proudění)
- Sprchový absorbér (rovnoměrné vstřikování co nejmenějších kapek)
- Probublávající absorbér (průchod spalin vrstvami kapaliny ve formě bublin)



Obr. 15 Sprchový absorbér [30]

Adsorpce

Principem tohoto čištění spalin je dávkování adsorbentu (aktivního uhlí) do prostoru před tkaninové filtry. Vlivem vysokého měrného povrchu dochází k navázání PCDD/F a rtuti do aktivního uhlí a následného zachycení na tkaninových filtrech. Společně s aktivním uhlím lze do proudu spalin před filtry dávkovat i mletý vápenec či vápenný hydrát a jiné alkalické přísady za účelem redukce kyselých složek (HCl , SO_2 , HF) obsažených ve spalinách. [30]

Způsob čištění spalin při spolu-spalování kalu ve spalovnách odpadu [16]:

- Suché čištění spalin:
- tvořeno látkovými filtry, využívá se konstantní teploty okolo 160°C , tato teplota je regulována bojlerem
 - využívá se k odstranění prachu, těžkých kovů, HCl , HF a SO_3
 - do potrubí před filtry je dávkováno vápno, vápenec a aktivní uhlí, které svým vysokým měrným povrchem slouží k absorpci výše zmíněných látek, následně dochází k zachycení a odloučení tak z proudu spalin na filtrech
- Mokrý čištění spalin:
- zařízení konstruováno jako průtoková pračka (scrubber) s kyselou vodou, protiproudové pračky, skrápěcím zařízením za každou pračku a souproudým parním přehřívákem
 - prvním krokem je odstranění kyselých látek jako je HCl , HF , SO_3 a k separaci těkavých látek
 - druhý krok spočívá v odstraňování SO_2
 - odpadní voda z praček je následně čištěna v ČOV a následně přivedena zpět k prvnímu kroku

Oxidy dusíku (NO_x) a dioxiny spolu s furany (PCDD/F) jsou ze systému čištění spalin odstraňovány pomocí katalytické reakce ve výměníku spaliny/spaliny s využitím vysokého tlaku přehřáté páry.

8 Termické zpracování ČK v zahraničí

8.1 Německo

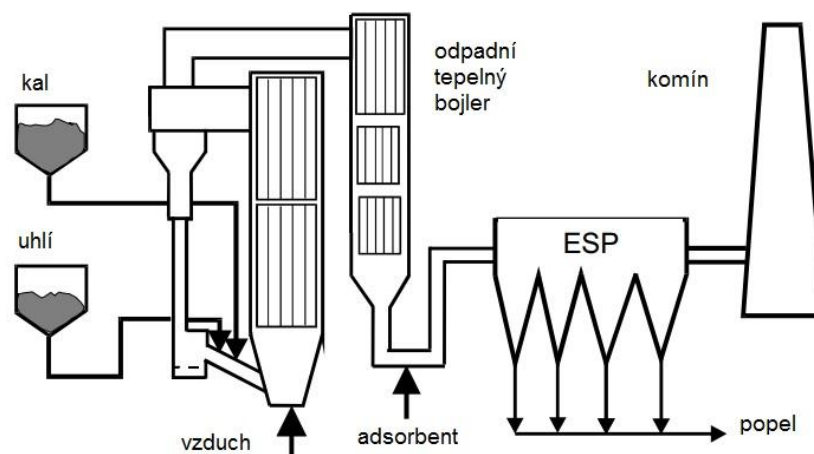


Obr. 16 Seznam elektráren ke spolu-spalování čistírenského kalu na území Německa [31]

Jak je jistě známo, Německo patří mezi hlavní evropské tahouny v oblasti techniky, není tomu naopak ani v oblasti nakládání s čistírenskými kaly. Německo v roce 2010 vyprodukovalo dle statistického úřadu Destatis [32], okolo 1,9 milionů tun sušiny kalu. Z tohoto množství byla více jak polovina spalována (53%), ať už v zařízeních ke spalování kalu nebo jako příměsné palivo. Další 30% bylo využito jako hnojivo v zemědělství a okolo 14% kalu bylo skládováno. Celková produkce vzrostla oproti roku 2006 přibližně o 8%. Jak je možné vidět na **obr.3** celkové množství spalovaného kalu vzrostlo přibližně o 10% oproti roku 2006.

Německo také využívá spolupráce s ostatními státy EU za účelem redukce množství ČK, jedná se o import granulovaného kalu z Nizozemska za účelem spalování, nebo využití kalu z Lucemburska ke kompostování či spalování. [33]

Mezi přední energetické společnosti Německa v oblasti spolu-spalování kalu patří především RWE energy a EnBW Energy. Obě tyto společnosti se vyznačují vysokým počtem zařízení využívající technologii spolu-spalování kalu, ať už jde o využití elektráren či spaloven odpadu. Mezi nejznámější zařízení patří elektrárna Berrenrath v Kolíně (RWE), která v období od 1.1.2007 - 30.5.2008 spálila 297 900 tun kalu spolu s 1 120 000 tun hnědého uhlí. Dalším velkým zástupcem v oblasti spolu-spalování v elektrárnách je Heilbronn (EnBW). Tato uhelná elektrárna spotřebuje ročně 1,2 milionů tun černého uhlí spolu s 20 000 tunami suchého a 60 000 tun mechanicky odvodněného kalu. Jak je možné vidět na **obr.17** kal je přiváděn do mlecího zařízení spolu s uhlím a následně dávkován do pece. [31] [34]



Obr. 17 Schéma spolu-spalování v elektrárně Berrenrath [31]

8.2 Nizozemsko

Nizozemská politika ohledně nakládání s ČK je odlišná od ostatních evropských zemí, vzhledem ke stále přísnějším normám ohledně využívání kalů na půdu, zde od roku 1996 platí zákaz recyklace kalů v zemědělství. Mezi další odlišnost patří především výroba granulovaného kalu, který je následně používán k přímému spalování anebo jako příměsné palivo v elektrárnách. Výrobou granulovaného kalu se zabývá soukromá německá firma GMB, tato společnost využívá dvou kompostáren zpracovávající okolo 15% celkové produkce kalu v Nizozemsku. Celková produkce kalu byla v roce 2008 přibližně 1,5 miliónů tun sušiny. Zbytek asi 58% kalu je spalováno a 27% termálně sušeno. [35]

Kalová problematika ohledně spolu-spalování kalu je v Nizozemsku přímo spjata s biomasou. Ve většině zařízení je kal spalován spolu s ostatní biomasou (dřevěný odpad, kal z papíren atd.) ať už ve formě pelet, nebo jen drcené.

Hemweg

Mezi nejznámější zařízení patří elektrárna Hemweg, která od roku 1997 začala spalovat ČK společně s uhlím a ostatní biomasou na jednotce 8. Čistý výkon elektrárny je 630 MWe s výrobou 2000 tun páry za hodinu. Ročně je zde spalováno okolo 75 000 tun sušiny kalu spolu s 1,6 miliónu tun uhlí. [36]



Obr. 18 Elektrárna Hemweg 8 [37]

8.3 Rakousko

Jak už bylo zmíněno na legislativních parametrech evropská politika ohledně ČK chce zamezit likvidaci kalu uložením na skládky. Rakousko k tomu řešení přistoupilo v roce 2004 striktním zakázáním skladování kalu. Takto stanovený předpis měl razantní vliv na využití trendu spalování, kdy celková bilance spalování se pohybuje okolo 35%, 15% je využíváno na půdu a okolo 50% kalu je využito na půdu po předchozím zpracování (např.: kompostování). Rakouská politika ohledně spalování kalu preferuje spíše spolu-spalování s jiným odpadem či s uhlím v elektrárnách, před spalováním kalu s následným získáním fosforu z popele a to především vlivem snížení nákladů. [38]

Simmeringer Haide

Spalovna odpadu a ČK Simmeringer Haide je největším zařízením ke spolu-spalování kalu spolu s odpadem v Rakousku. Každoročně do zařízení přichází okolo 2 mil. m³ odpadního kalu dodávaného ČOV ve Vídni, ten následně prochází odstředivkami pro snížení obsahu vody a následně je kal tepelně zpracován ve fluidních pecích při teplotě cca 950 °C. Následně je teplo pomocí výměníku přeměněno na energii, zbývající spaliny jsou podrobeny vícestupňovému čištění spalin (elektrostatický odlučovač, aktivní filtr, 4 fáze mokrého praní, katalytické denitrifikační zařízení). Roční produkce se pohybuje kolem 55 000 MWh elektřiny a 500 000 MWh dálkového tepla pro vytápění. [39]



Obr. 19 Spalovna komunálního odpadu a ČK Simmeringer Haide [39]

9 Závěr

Práce byla zaměřena na problematiku spolu-spalování čistírenských kalů v již stávajících zařízeních, jako jsou teplárny, cementárny a spalovny odpadů. Kal jakožto vedlejší produkt čistíren odpadních vod je vlivem své toxicity řazen do kategorie odpadů, tudíž je nutné tak sním i zacházet.

Po celkovém průzkumu ohledně celosvětového využití kalů byl potvrzen fakt, že vzhledem k velké míře toxických prvků se řadí spalování kalu mezi nejefektivnější metodu, co už do problému redukce množství či zachycení polutantů v systému čištění spalin. Dalším pozitivem využití trendu spalování kalu je možnost využití energetického potenciálu za účelem výroby elektrické energie. Vlivem vysokého obsahu vody je nutné nejprve vynaložit velké množství energie na sušení, neboť výhřevnost kalu přímo úměrně narůstá se stupněm odvodnění. Ke snížení energetické náročnosti procesu sušení je možné využít spalné teplo přímo v zařízení určeném ke spalování kalu. Vzhledem k nutnosti dopravy nevysušeného kalu z ČOV do zařízení narůstá tvorba emisí vlivem většího dopravovaného množství.

Na základě obecného zhodnocení využití existenčních zařízení ke spolu-spalování kalu, se jeví cementárny jako nejlepší možná varianta vzhledem k zakomponování popele vytvořeného procesem spálení do cementářského slinku a vytvoření tak bezodpadové technologie. Ale vzhledem k vysokým nákladům na vysušení kalu o obsahu 90% sušiny není tato technologie z ekonomického hlediska využívána ve velkém měřítku jako například spolu-spalování v elektrárnách. Elektrárny se z ekonomického hlediska považují jako nejlepší a to převážně snížením nákladů na sušení kalu, které u této metody není vyžadováno na vysoké úrovni vzhledem ke spalování "pouhých" 5% z celkového množství paliva.

Vzhledem k ekologičnosti spalovacího procesu a technologickému pokroku v oblasti čištění vzniklých spalin, nebyl zjištěn žádný zásadní problém ohledně nespalování kalu na území ČR. Fakt ohledně nespalování kalu na našem území je dán především neinformovaností obyvatelstva ohledně účinnosti systému čištění spalin a obecným úsudkem toho, že "co hoří je velmi škodlivé". Faktem je, že při spolu-spalování produkujeme zvýšené množství dusíkatých sloučenin a je proto nutností zařazení SCR či přidání amoniaku během spalování.

Dle průzkumu zahraničního vývoje a přístupu států k nakládání s čistírenským kalem, je jen otázkou času, kdy i v ČR dojde k zařazení spolu-spalování či spalování do způsobů konečné likvidace.

9 Bibliografie:

- [1] Česká Republika. Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 61/2003 Sb., o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech. In: *Předpis č.229/2007 Sb.* Praha, 2007, 73/2007. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2007-229/zneni-20100101>.
- [2] DOHÁNYOS, Michal. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. In: *Biom.cz* [online]. [cit. 2013-02-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>.
- [3] VŠCHT. *Kalové hospodářství čistíren odpadních vod* [online]. Praha, 2007, 2.10. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://web.vscht.cz/starad/COV_Skripta_Kal_hosp.doc.
- [4] Česká Republika. Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě. In: *Přepis č.382/2001 Sb.* Praha, 2001, 145/2001. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-382>.
- [5] LYČKOVÁ, Barbora, Petr FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Zpracování kalů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-1600-5.
- [6] HARTMAN, Miloslav, Karel SVOBODA, Veselý VÁCLAV, Otakar TRNKA a Josef CHOUR. Tepelné zpracování čistírenských kalů. *Chemické listy*. Praha: Česká společnost chemická, 2003, roč. 97, s. 976-982. ISSN 0009-2770.
- [7] KUTIL, Josef a Michal DOHÁNYOS. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. 2005 [cit. 2012-12-07]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz-bioplyn/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>
- [8] ŠTÁSTA, Pavel et al. *Alternativní možnosti zpracování čistírenských kalů*. Praha: SOVAK, 2004, roč. 2004, č. 3. ISSN 1210-3039.
- [9] TNI CEN/TR 13717. *Charakterizace kalů - Nakládání s kaly ve vztahu k jejich využití nebo odstraňování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [10] Největší ekologické problémy v ČR. MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Składka-odpadu.cz* [online]. [cit. 2013-03-08]. Dostupné z: <http://www.skladka-odpadu.cz/nejvetsi-ekologicke-problemy-v-cr/>.
- [11] THOMÉ-KOZMIENSKY, Karl J. a Stephanie THIEL. *Waste Management- Recycling and Recovery*. vol.3. Neuruppin, 2012. ISBN 978-3-935317-83-2.
- [12] PYTL, Vladimír. *Příručka provozovatele čistírny odpadních vod*. Libeznice: Medim, spol. s r.o., 2012. ISBN 978-80-87140-26-0.
- [13] CARBONELL, G. et al. Sewage sludge applied to agricultural soil: Ecotoxicological effects on representative soil organisms. *Sciencedirect.com* [online]. 2009 [cit. 2013-01-28]. ISSN 13364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651309000244>.
- [14] BORÁŇ, Jaroslav. *Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím: zkrácená verze Ph.D. Thesis*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-214-36-7.

- [15] FYTILI, D. a A. ZABNIOTOU. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods. *Sciencedirect.com* [online]. 2008 [cit. 2013-01-28]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106000827>.
- [16] The European IPPC Bureau, *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*, 2006. [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://eippcb.jrc.es/reference/wi.html>.
- [17] Využití odpadních kalů. *homen.vsb.cz*. [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/vyuziti.html>.
- [18] EVROPSKÁ KANCELÁŘ IPPC. *Integrovaná prevence a omezování znečištění: Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadu (BREF)* [online]. Seville: Institut perspektivních technologických studií, 2005 [cit. 2013-02-18]. Dostupné z: <http://www.ippc.cz/dokumenty/DC0084>.
- [19] TNI CEN/TR 13768. *Charakterizace kalů - Správná praxe pro společné spalování kalů a komunálního odpadu*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [20] RICHERS, U., W. SCHEURER, H. SEIFERT a K.R.G HEIN. Present status and perspectives od co-combustion in German power plants. *Výzkumné centrum Karlsruhe GmbH* [online]. 2002 [cit. 2013-03-30]. ISSN 0947-8620.
- [21] WERTHER, J. a T. OGADA. Sewage sludge combustion. *Sciencedirect.com*. 1999. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128598000203>.
- [22] TCHOBANOGLIOUS, George a BURTON. *Wastewater Engineering - Treatment Disposal Reuse*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-041690-7.
- [23] KROPÁČ, J. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-03-30]. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [24] Snižování tuhých emisí. *Energyweb.cz* [online]. [cit. 2013-03-30]. Dostupné z: http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.5.4.
- [25] REMEDIA D/F catalyc filter system. *Gore.com* [online]. 2000 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z: http://www.gore.com/MungoBlobs/175/391/remedia_overview.pdf.
- [26] JECHA, D. *Absorpční čištění spalin vznikajících spalováním odpadu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-01-18]. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] Česká Republika. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: č. 185/2001 Sb. Praha, 2001, 71/2001. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185#cast3>.
- [28] Evropská Unie. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU ze dne 24.listopadu 2010 o průmyslových emisích. In: Úřední věstník Evropské unie, 2010. Dostupné z: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119>.
- [29] Česká Republika. Zákon o ochraně ovzduší: Sbírka zákonů. In: 201/2012 Sb. Praha, 2012, 69. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>.
- [30] Česká Republika. Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejich zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší: Sbírka zákonů. In: č. 415/2012 Sb. Praha, 2012, 151/2012. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>.

- [31] WERTHER, Joachim. Sustainable and energy-efficient utilization of biomass by co-combustion in large-scale power stations. *Http://ser.cienve.org.tw* [online]. 2009 [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: http://ser.cienve.org.tw/download/19-3/jeeam19-3_135-144.pdf.
- [32] DESTATIS. [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: https://www.destatis.de/EN/PressServices/Press/pr/2011/12/PE11_480_32214.html
- [33] KELESSIDIS a A., S. STASINAKIS. Comparative study of the methods used for treatment and final ddisposal of sewage sludge in European countries. *Sciencedirect.com* [online]. 2012 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12000268#>.
- [34] KIPSHAGEN, Franz-Josef a Bernhard ROPER. RWE ENERGY. *SRF Co-combustion at RWE*. 2008. Dostupné z: <http://www.boscoenergy.com.au/documents/Usage-of-Solid-Recovered-Fuels-SRF-in-RWE-power-plants.pdf>.
- [35] MILIEU LTD. *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land: Final report* [online]. Part III: Project Interim Reports. Brussel, 2010 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_iii_report.pdf.
- [36] Hemweg. *Powerplants.vattenfall.com* [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://powerplants.vattenfall.com/node/364>.
- [37] Power units Amsterdam clustler. *nuon.com* [online]. [cit. 2013-03-28]. Dostupné z: <http://www.nuon.com/company/core-business/energy-generation/power-stations/Amsterdam-cluster.jsp>.
- [38] RONALD, J., P. MATTHEWS a P.R. RICHARD. *Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management* [online]. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2008 [cit. 2013-03-30]. ISBN 978-92-1-132009-1. Dostupné z: http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/habitat2008.pdf.
- [39] Simmeringer Haide. *Wienenergie.at* [online]. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: <http://www.wienenergie.at/eportal/ep/programView.do/pageTypeId/19118/programId/19734/channelId/-28276>.
- [40] *Eurostat* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Water_statistics.

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma procesu získávání čistírenského kalu a následného nakládání [8]	14
Obr. 2 Hierarchie odpadu [10].....	14
Obr. 3 Metody nakládání s čistírenským kalem v zemích EU (2000-2006) [11]	16
Obr. 4 Graf závěrečného způsobu využití kalů na území ČR v roce 2009 [40]	17
Obr. 5 Schéma zařízení pro spalování čistírenského kalu [11].....	18
Obr. 6 Graf závislosti obsahu vody na výhřevnosti kalu ASK 55%VL	19
Obr. 7 Graf závislosti výhřevnosti kalu na množství organických látek v sušině	20
Obr. 8 Fluidní lože [14].....	21
Obr. 9 Schéma spalování v etážové peci [17].....	22
Obr. 10 Schéma systému spalování v rotačních pecích [18]	23
Obr. 11 Schéma spolu-spalování v elektrárnách se systémem čištění spalin [20].....	24
Obr. 12 Schéma elektrostatického odlučovače [28]	31
Obr. 13 Schéma provozního principu SCR [18].....	32
Obr. 14 Schéma čištění spalin REMEDIA D/F katalytickými filtry [29].....	32
Obr. 15 Sprchový absorbér [30]	33
Obr. 16 Seznam elektráren ke spolu-spalování čistírenského kalu na území Německa [31].....	34
Obr. 17 Schéma spolu-spalování v elektrárně Berrenrath [31].....	35
Obr. 18 Elektrárna Hemweg 8 [37]	35
Obr. 19 Spalovna komunálního odpadu a ČK Simmeringer Haide [39]	36

Seznam tabulek

Tab. 1 Maximální hodnoty koncentrací rizikových látek při použití na zemědělskou půdu [4].....	12
Tab. 2 Podíl složek paliva v kalu ASK 55% VL	18
Tab. 3 Koncentrace složek paliva v hořlavině kalu ASK 55%VL	18
Tab. 4 Vypočítané hodnoty spalného tepla a výhřevnosti kalu ASK 55%VL.....	19
Tab. 5 Obecné emisní limity (Příloha č. 9 k vyhlášce č. 415/2012 Sb.)	28
Tab. 6 Ekvivalenty toxicity dibenzodioxinů a dibenzofuranů [26]	28
Tab. 7 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 55% VL	44
Tab. 8 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 30% VL	45
Tab. 9 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 40% VL	46
Tab. 10 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 50% VL	47
Tab. 11 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 50% VL	48

Seznam použitých symbolů a zkratek:

Zkratky

ČK	<i>Čistírenský kal</i>
ČOV	<i>Čistírna odpadních vod</i>
NO_x	<i>Oxidy dusíku</i>
SO_x	<i>Oxidy síry</i>
PCB	<i>Polychlorované bifenyly</i>
PCCD/F	<i>Dioxiny (obecně celá skupina)</i>
TZL	<i>Tuhé znečišťující látky</i>
ESP	<i>Elektrostatické odlučovače</i>
SCR	<i>Selektivní katalytická redukce</i>
VL	<i>Obsah organických látek</i>
ASK	<i>Anaerobně stabilizovaný kal</i>
TEQ	<i>Ekvivalent toxicity</i>

Symoly

HHV_h	<i>Spalné teplo hořlaviny</i>	[kJ/kg]
HHV	<i>Spalné teplo paliva</i>	[kJ/kg]
A	<i>Popeloviny</i>	[-]
W	<i>Voda</i>	[-]
LHV	<i>Výhřevnost</i>	[kJ/kg]
r_{H2O}	<i>Výparné teplo vody při 20°C</i>	[kJ/kg]
W_{celk}	<i>Celkové množství H₂O</i>	[kg/kg]
W_p	<i>Obsah vody v původním palivu</i>	[kg/kg]
MW_{H2O}	<i>Molekulová hmotnost složky H₂O</i>	[-]
MW_{H2}	<i>Molekulová hmotnost složky H₂</i>	[-]
x_{H,korig}	<i>Korekce spalného tepla na výhřevnost</i>	[-]
B_p	<i>Obsah hořlaviny v celkovém palivu</i>	[kg/kg]
MW_{H(1)}	<i>Molekulová hmotnost složky H₍₁₎</i>	[-]
MW_{Cl}	<i>Molekulová hmotnost složky Cl</i>	[-]
MW_F	<i>Molekulová hmotnost složky F</i>	[-]

Seznam příloh

Příloha	1 - CD s bakalářskou prací v elektronické podobě
Příloha	2 - Vypočtené hodnoty výhřevností za pomoci softwaru MS Excel

PŘÍLOHA 2 - VYPOČTENÉ HODNOTY VÝHŘEVNOSTÍ V ZÁVISLOSTI NA OBSAHU ORGANICKÝCH LÁTEK

55% organických látek	
Hořlavina	0,23
Voda	0,35
Popelovina	0,42

	Poměr Hořlavina / Popelovina [%]	Obsah vody [%]	Hořlavina [%]	Popeloviny [%]	Obsah v %	Spalné teplo hořlaviny [kJ/kg]	Spalné teplo paliva [kJ/kg]	Výhřevnost [kJ/kg]	Wh	Wcelk [kg/kg]
1	0,55	0	0,35	0,65	1	31039,11	10983,07	10525,23	0,19	0,18
2		0,1	0,32	0,58			9884,76	9227,30	0,16	0,27
3		0,2	0,28	0,52			8786,46	7929,38	0,15	0,35
4		0,3	0,25	0,45			7688,15	6631,46	0,13	0,43
5		0,4	0,21	0,39			6589,84	5333,53	0,11	0,51
6		0,5	0,18	0,32			5491,54	4035,61	0,09	0,59
7		0,6	0,14	0,26			4393,23	2737,69	0,07	0,67
8		0,7	0,11	0,19			3294,92	1439,77	0,05	0,76
9		0,8	0,07	0,13			2196,61	141,84	0,03	0,84
10		0,9	0,04	0,06			1098,31	-1156,08	0,02	0,92
Σ		1	0	0			0	-2454	0	1

Tab. 7 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 55% VL

30% organických látek	
Hořlavina	0,15
Voda	0,35
Popelovina	0,5

	Poměr Hořlavina / Popelovina [%]	Obsah vody [%]	Hořlavina [%]	Popeloviny [%]	Obsah v %	Spalné teplo hoř- laviny [kJ/kg]	Spalné teplo paliva [kJ/kg]	Výhřevnost [kJ/kg]	Wh	Wcelk [kg/kg]
1	0,30	0	0,23	0,77	1	31039,12	7162,87	6864,28	0,12	0,12
2		0,1	0,21	0,69			6446,58	5932,45	0,11	0,21
3		0,2	0,18	0,61			5730,30	5000,62	0,10	0,30
4		0,3	0,16	0,54			5014,01	4068,79	0,08	0,38
5		0,4	0,14	0,46			4297,72	3136,97	0,07	0,47
6		0,5	0,11	0,38			3581,44	2205,14	0,06	0,56
7		0,6	0,09	0,31			2865,15	1273,31	0,05	0,65
8		0,7	0,07	0,23			2148,86	341,48	0,04	0,74
9		0,8	0,05	0,15			1432,57	-590,34	0,02	0,82
10		0,9	0,02	0,08			716,29	-1522,18	0,01	0,91
Σ		1	0	0			0	-2454	0	1

Tab. 8 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 30% VL

40% organických látek	
Hořlavina	0,187
Voda	0,35
Popelovina	0,463

	Poměr Hořlavina / Popelovina [%]	Obsah vody [%]	Hořlavina [%]	Popeloviny [%]	Obsah v %	Spalné teplo hořlaviny [kJ/kg]	Spalné teplo paliva [kJ/kg]	Výhřevnost [kJ/kg]	Wh	Wcelk [kg/kg]
1	0,40	0	0,29	0,71	1	31039,11	8929,71	8557,47	0,15	0,15
2		0,1	0,26	0,64			8036,74	7456,32	0,14	0,24
3		0,2	0,23	0,57			7143,77	6355,17	0,12	0,32
4		0,3	0,20	0,50			6250,80	5254,03	0,11	0,41
5		0,4	0,17	0,43			5357,83	4152,88	0,09	0,49
6		0,5	0,14	0,36			4464,86	3051,73	0,07	0,58
7		0,6	0,11	0,28			3571,89	1950,59	0,06	0,66
8		0,7	0,09	0,21			2678,91	849,44	0,05	0,74
9		0,8	0,06	0,14			1785,94	-251,71	0,03	0,83
10		0,9	0,03	0,07			892,97	-1352,85	0,02	0,92
Σ		1	0	0			0	-2454	0	1

Tab. 9 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 40% VL

50% organických látek	
Hořlavina	0,217
Voda	0,35
Popelovina	0,433

	Poměr Hořlavina / Popelovina [%]	Obsah vody [%]	Hořlavina [%]	Popeloviny [%]	Obsah v %	Spalné teplo hořlaviny [kJ/kg]	Spalné teplo paliva [kJ/kg]	Výhřevnost [kJ/kg]	Wh	Wcelk [kg/kg]
1	0,50	0	0,33	0,67	1	31039,11	10362,29	9930,32	0,18	0,18
2		0,1	0,30	0,60			9326,06	8691,90	0,16	0,26
3		0,2	0,27	0,53			8289,83	7453,46	0,14	0,34
4		0,3	0,23	0,47			7253,60	6215,03	0,12	0,42
5		0,4	0,20	0,40			6217,37	4976,59	0,10	0,50
6		0,5	0,17	0,33			5181,14	3738,16	0,09	0,59
7		0,6	0,13	0,27			4144,91	2499,73	0,07	0,67
8		0,7	0,10	0,20			3108,69	1261,30	0,05	0,75
9		0,8	0,07	0,13			2072,46	22,86	0,03	0,84
10		0,9	0,03	0,07			1036,23	-1215,57	0,02	0,92
Σ		1	0	0			0	-2454	0	1

Tab. 10 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 50% VL

60% organických látek	
Hořlavina	0,245
voda	0,35
Popelovina	0,405

	Poměr Hořlavina / Popelovina [%]	Obsah vody [%]	Hořlavina [%]	Popeloviny [%]	Obsah v %	Spalné teplo hořlaviny [kJ/kg]	Spalné teplo paliva [kJ/kg]	Výhřevnost [kJ/kg]	Wh	Wcelk [kg/kg]
1	0,60	0	0,38	0,62	1	31039,11	11699,36	11211,66	0,20	0,20
2		0,1	0,34	0,56			10529,42	9845,09	0,18	0,28
3		0,2	0,30	0,50			9359,49	8478,52	0,16	0,36
4		0,3	0,26	0,44			8189,55	7111,96	0,14	0,44
5		0,4	0,23	0,37			7019,61	5745,39	0,12	0,52
6		0,5	0,19	0,31			5849,68	4378,83	0,10	0,60
7		0,6	0,15	0,25			4679,74	3012,26	0,08	0,68
8		0,7	0,11	0,19			3509,81	1645,70	0,06	0,76
9		0,8	0,07	0,12			2339,87	279,13	0,04	0,84
10		0,9	0,04	0,06			1169,94	-1087,43	0,02	0,92
Σ		1	0	0			0	-2454	0	1

Tab. 11 Přehled výsledných vypočtených hodnot výhřevnosti pro kal ASK 50% VL